

## Beschreibung

## Thermowellen-Meßverfahren

- 5 Die Erfindung betrifft eine schnelle berührungslose, geometrische sowie thermische Charakterisierung eines planaren Mehrschichtaufbaues. Diesbezügliche Messungen sind beispielsweise bei Auto-Mehrschichtlackierungen gefragt. Die Kategorie von Thermowellen-Meßverfahren sind beispielsweise unter den  
10 Bezeichnungen Wärmewellen, photothermische und photoakustische Verfahren oder Lock-In-Thermographie, bekannt.

Zum Stand der Technik gehören Verfahren, die beispielsweise unter der Bezeichnung „photothermische Meßverfahren, Thermowellen-Meßverfahren oder Lock-In-Thermographie“ laufen. Darin  
15 wird ein zu prüfendes Material mit einem oberflächlichen Schichtaufbau durch eine Heizquelle periodisch und bereichsweise aufgeheizt. Die Heizung muß modulierbar sein, so daß eine Amplitudenmodulation vorliegt. Damit können die Modulationsfrequenzen der Heizung sequentiell durchgestimmt werden,  
20 und das photothermische Signal, das von einer Probe herrührt, wird nach Amplitude und insbesondere seiner Phase als Funktion der Frequenz gemessen. Dabei kann die Auswertung hinsichtlich zweier oder mehrerer Unbekannter (z.B. Schichtdicken) im  
25 allgemeinen nicht in geschlossener analytischer Form durchgeführt werden, da hier ein "inverses Problem" vorliegt. Dies ist gleichbedeutend damit, daß die Auflösung des Gleichungssystems nach einer Unbekannten nicht ohne weiteres möglich ist.

30

Nachteile der zum Stand der Technik gehörenden Verfahren bestehen beispielsweise darin, daß die sequentielle Durchstimmung der Modulationsfrequenz der modulierbaren Wärmequelle sehr lange dauert.

35

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Thermowellen-Meßverfahren bereitzustellen, mit dem eine wesentliche Be-

schleunigung einer entsprechenden Messung und Auswertung erzielbar ist. Ein wesentliches Ziel besteht im Einsatz eines schnellen Thermowellen-Meßverfahrens zur Kontrolle von Schichtaufbauten in der laufenden Produktion.

5

Die Lösung dieser Aufgabe geschieht durch die Merkmalkombination des Anspruchs 1.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß die für die  
10 bereichsweise Aufheizung eines Schichtaufbaues verwendete Wärmequelle gleichzeitig mit mehreren unterschiedlichen Frequenzen ansteuerbar ist, und die emittierte Infrarotstrahlung korrespondierend zu den Ansteuerfrequenzen simultan auswertbar ist. Somit können bestimmte Stützpunkte aus einer Kennli-  
15 nie zur sequentiellen Durchstimmung der Wärmequelle über die Frequenz festgelegt werden, woraus sich eine bestimmte Anzahl von unterschiedlichen diskreten Frequenzen ergibt. Diese werden gleichzeitig zur Ansteuerung der Wärmequelle verwendet, so daß die eigentliche Durchstimmung der Wärmequelle über die  
20 Frequenz nicht mehr durchgeführt wird, woraus sich eine wesentliche Zeiteinsparung ergibt.

Weitere Ausgestaltungen sind den Unteransprüchen zu entnehmen.

25

Als Wärmequelle können insbesondere eine Licht emittierende Diode (LED) oder eine Laserdiode vorteilhaft eingesetzt werden, da sie elektrisch amplituden-modulierbar sind. Grundsätzlich können sämtliche Heizquellen eingesetzt werden, die  
30 die Möglichkeit einer elektrischen Modulation bieten, so daß eine Mehrfrequenzanregung durchführbar ist.

Liegt eine bestimmte Schichtenfolge an der Oberfläche einer Probe vor, so kann in vorteilhafter Weise eine objektbezogene  
35 Einstellung der Ansteuerfrequenzen bei der Wärmequelle vorgenommen werden. Es gilt der Zusammenhang, daß mit sinkender Modulationsfrequenz an der Wärmequelle eine steigende Ein-

dringtiefe in den Schichtaufbau einhergeht. Die Auswahl der Ansteuerfrequenzen entsprechend einem bekannten Schichtaufbau kann vorteilhaft eingestellt werden.

- 5 Mit dem Ansatz einer Regressionsanalyse mit nicht linearen Ansatzfunktionen bzw. mit einem lernfähigen neuronalen Netzwerk können die Zielgrößen, beispielsweise einzelne Schichtdicken, numerisch ermittelt werden. Dabei können experimentelle oder theoretisch/analytische Stützwerte als Kalibrierwerte verwendet werden.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen können den Unteransprüchen entnommen werden.

- 15 Im folgenden werden anhand von schematischen Figuren weitere Ausführungsbeispiele beschrieben.

Figur 1 zeigt einen Versuchsaufbau zur Durchführung eines Verfahrens entsprechend der Erfindung,

20

Figur 2 zeigt in Abhängigkeit von der Ansteuerfrequenz einer Wärmequelle die Phasenverschiebung von zurückgestrahlten Wärmewellen,

- 25 Figur 3 zeigt Referenz- und Detektorsignal bei einer Modulation von 10 Hz für zwei Frequenzgeber (Chopper),

Figur 4 zeigt Referenz- und Phasensignal bei einer Modulation von 10 Hz für beide Chopper 1, 2,

30

Figur 5 zeigt Referenz- und Detektorsignal bei einer Modulation von 40 und 20 Hz,

- 35 Figur 6 zeigt Referenz- und Phasensignal bei einer Modulation von 40 und 20 Hz.

Durch die simultane Mehrfrequenzanregung und gleichzeitige Parallelauswertung hinsichtlich der verschiedenen Frequenzen bzw. der unterschiedlichen zurückgestrahlten korrespondierenden Infrarotstrahlung wird die Meßzeit drastisch verkürzt.

5 Dabei kann durch geeignete Wahl der Einzelfrequenzanteile der Frequenzmeßbereich, in dem die Wärmequelle angesteuert wird, genau dem Meßproblem angepaßt werden. Die gleichzeitige Intensitätsmodulation mit zwei oder mehreren Einzelfrequenzen auf eine elektrisch modulierbare Wärmequelle ermöglicht die  
10 parallele Auswertung in einer entsprechenden Anzahl von Lock-In-Verstärkern. Stattdessen kann auch die Signalauswertung mit einer FFT oder ähnlichen digitalen Auswerteverfahren, wie Korrelation oder Anfitten einer Sinus-Funktion, unter Einsatz eines digitalen Oszilloskopes, erfolgen.

15 Als Wärmequelle wird in der Regel eine Heizlichtquelle verwendet, wie beispielsweise eine Laserdiode oder ein LED. Zur Auswertung nach einer entsprechenden Anzahl von Lock-In-Verstärkern oder einer Fast-Fourier-Transformation können  
20 entweder die Regressionsanalyse oder ein neuronales Netzwerk eingesetzt werden.

Das wesentliche Merkmal der Erfindung besteht in der Gleichzeitigkeit, mit der eine Wärmequelle mit unterschiedlichen  
25 Frequenzen angesteuert wird. Sind beispielsweise drei Frequenzen ausgewählt worden, so liefert deren Summe ein Analogsignal, mit dem die Wärmequelle moduliert wird. Auf der Auswerteseite wird für jede Frequenz entsprechend ausgewertet. Dies geschieht gleichzeitig.

30 In einem Versuchsaufbau entsprechend Figur 1 wird eine Standardprobe 7, die aus einer TiN-Schicht auf einem Glasplättchen besteht, vermessen. Dabei heizt ein von einem Laser 3 abgegebener Heizstrahl die Probe bereichsweise auf. Der Heizstrahl wird nach dem Austritt aus dem Laser geteilt, wobei  
35 jeder der beiden Strahlen einem mechanischen Chopper 1, 2 zugeführt wird. Beim Durchlaufen der Chopper 1, 2 werden beide

Strahlen mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen  $f_1$ ,  $f_2$  moduliert und anschließend gemeinsam fokussiert und auf die Probe 7 gerichtet. Dadurch ist es auch mit mechanischer Modulation möglich, die Probe simultan mit zwei Modulationsfrequenzen anzuregen. Eine elektronische Bereitstellung der verschiedenen Frequenzen ist vorteilhaft. Nachdem das Detektorsignal 8 auf zwei verschiedene Lock-In-Verstärker 10, 20 gegeben ist, erhält man als Ergebnis entsprechend zwei Phasen 11, 21, die auf einem Speicheroszillographen 13 darstellbar sind. Der jeweilige Referenzeingang 12, 21 der Lock-In-Verstärker 10, 20 ist mit der Modulationsfrequenz der Chopper 1 bzw. 2 belegt. Um die beiden Strahlengänge aufeinander abzustimmen, wird zunächst eine Phase-Frequenz-Kurve aufgenommen, d.h. die Frequenz von beiden Choppern 1, 2 wird simultan durchgestimmt. Das Ergebnis ist in Figur 2 dargestellt. In Figur 2 ist zu erkennen, daß sich mit höheren Frequenzen von mehr als ca. 20 Hz die Frequenzverschiebung bei ungefähr  $-45^\circ$  einstellt. Dies gilt gleichermaßen für Chopper 1 und für Chopper 2.

20

In Figur 3 werden die Ergebnisse dargestellt, wenn beide Chopper 1, 2 auf 10 Hz fest eingestellt sind und das Detektorsignal 8 gemessen wird. In den Darstellungen der Figuren 3-6 ist jeweils links neben jedem Signalverlauf ein Rahmen mit drei Angaben dargestellt. Darin bedeuten die ersten zwei Angaben die Skalierung auf den Achsen des Speicheroszillographen. Der erste Wert sagt aus, wieviele Millisekunden zwischen zwei Markierungen in einem Kästchen auf der Abszisse, auf der die Zeit angetragen ist, bedeuten. Der zweite Wert sagt aus, wieviel Volt auf der Ordinate, auf der die Spannung angetragen ist, der Abstand zwischen zwei Markierungen bzw. in einem Kästchen ausmacht. Der dritte Wert stellt das eigentliche Ergebnis dar, nämlich eine bestimmte Spannung, die in Volt oder in Millivolt gezählt, umgerechnet werden kann, beispielsweise für ein Amplituden- oder ein Phasensignal.

In den Figuren 3 und 4 sind jeweils Meßwerte für Referenz, Phasen- und Detektorsignal bei einer Modulation beider Chopper 1, 2 von 10 Hz dargestellt. In den Figuren 5 und 6 werden gleiche Darstellungen wie in den Figuren 3 und 4 verwendet, wobei jedoch die Modulation des ersten Choppers 1 40 Hz und die des zweiten Choppers 2 20 Hz beträgt.

Die Grundlage der dargestellten Meßwerte und Ergebnisse nach Figur 4 beinhalten, daß beide Chopper auf 10 Hz fest eingestellt sind und daß das Detektorsignal 8 gemessen wird. Die oberste rechte Kurve stellt den Verlauf der Impulsfolge am Chopper 1 dar. Eine vollständige Schwingung benötigt dabei die Länge von zwei Kästchen bzw. zweimal 50 ms, so daß hier eine Frequenz von 10 Hz vorliegt. Gleiches gilt für die mittlere Kurve, die am zweiten Chopper 2 vorliegt. Die unterste Kurve stellt das Detektorsignal 8 dar, welches zunächst ein analoges Signal ist. In allen drei Fällen ist die Amplitude des Signales jeweils als dritter Wert im nebenstehenden Rahmen eingetragen, wobei dies jedoch wählbare Versuchsparameter sind.

Figur 2 zeigt sowohl die Referenz als auch die Phase bei einer Modulation von 10 Hz für beide Chopper 1, 2. Die Impulsfrequenz ist identisch mit der Frequenz in Figur 3. Die Phasenlage der Chopper 1, 2 ist nahezu identisch mit -584 mV und -591 mV, was umgerechnet ungefähr einer Phasenverschiebung von  $60^\circ$  entspricht. Dabei ist zugrundegelegt, daß 10 mV stellvertretend für  $1^\circ$  Phasenverschiebung steht. Anders ausgedrückt, weist die von der Probe 7 zurückgestrahlte Infrarotwelle bzw. Wärmewelle eine Phasenlage auf, die um  $60^\circ$  der Phase des Lasersignales hinterherhinkt.

In den Figuren 5 und 6 werden den Figuren 3 und 4 entsprechende Signale dargestellt. Dieses Mal sind jedoch die ersten und zweiten Chopper 1, 2 auf unterschiedlichen Frequenzen moduliert. Der erste Chopper 1 weist jeweils eine Impulsfrequenz von 40 Hz und der zweite Chopper 2 eine Impulsfrequenz

von 20 Hz auf. Das Detektorsignal 8 ist wiederum ein aus mehreren Signalen überlagertes Ergebnissignal, das über die im Verfahren angewendete Signalverarbeitung umgewandelt wird. Auch für den in den Figuren 5 und 6 dargestellten Fall ist  
5 entsprechend dem zweiten und vierten Signal in Figur 6 die Phasenlage für beide Ansteuerfrequenzen annähernd gleich.

Durch die Messungen kann also nachgewiesen werden, daß es möglich ist, die Phase auch dann korrekt zu erhalten, wenn  
10 die Probe simultan mit zwei unterschiedlichen Frequenzen moduliert wird, anstatt wie bisher die Modulationsfrequenz durchzustimmen (Chirp).

Die Messung mit den beschriebenen mechanischen Choppern  
15 stellt nur eine Ausführung dar, wobei die Modulation von Laserdioden bzw. von LEDs mit mehreren Frequenzen gleichzeitig geplant ist. Darüber hinaus kann die flächige Ausleuchtung der Probe 8 durch entsprechende Einrichtungen sowie die Bildaufnahme mittels einer Kamera-Anordnung optimiert werden. Dabei  
20 liegt nach wie vor das Prinzip zugrunde, daß durch simultane Mehrfrequenzanregung und durch gleichzeitige Parallelauswertung der verschiedenen Frequenzen die Meßzeit verkürzt wird.

25 Wird gefordert, die geometrischen und thermischen Parameter eines Mehrschichtaufbaues gleichzeitig zu ermitteln, so kann dies unter Umständen mit herkömmlichen Rechenmethoden nicht möglich sein. Man kann eine analytische Formel für die Phase in Abhängigkeit von den thermischen und geometrischen Parametern,  
30 sowie von der Modulationsfrequenz angeben. Soll allerdings nach den den Mehrschichtaufbau charakterisierenden Größen aufgelöst werden, so ist dies analytisch nicht möglich. Dies bedeutet, daß ein „inverses Problem“ vorliegt. Die Auswertung kann dann durch numerische Verfahren wie beispielsweise  
35 Regressionsanalyse oder mittels eines Neuronalen Netzes erfolgen, was eine Automatisierung der Bestimmung der Materialparameter darstellt und mit einer höheren Genauigkeit und

mit einer Zeitersparnis verbunden ist. Außerdem eröffnet sich die Möglichkeit beliebige photothermisch vermessene Schichtaufbauten theoretisch zu beschreiben und deren thermische und geometrische Eigenschaften zu bestimmen.



## Patentansprüche

1. Thermowellen-Meßverfahren zur berührungslosen Messung von geometrischen und/oder thermischen Merkmalen eines Schicht-  
5 aufbaues, wobei eine modulierbare Wärmequelle mit unterschiedlichen Frequenzen angesteuert, und der Schichtaufbau periodisch aufgeheizt wird, von dem Schichtaufbau emittierte in der Intensität entsprechend modulierte Infrarotstrahlung empfangen und anhand von Amplitude und/oder Phase jeweils als  
10 Funktion einer Ansteuerfrequenz ausgewertet wird, wobei die Wärmequelle gleichzeitig mit mindestens zwei vorbestimmten diskreten Frequenzen amplitudenmoduliert wird, und die von dem Schichtaufbau emittierte Infrarotstrahlung gleichzeitig korrespondierend zu den Ansteuerfrequenzen ausgewertet  
15 wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, worin als Wärmequelle ein Laser bzw. eine Laserdiode oder eine lichtemittierende Diode (LED) verwendet wird.  
20
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin die Einzelfrequenzanteile der Ansteuerfrequenzen einem Meßproblem angepaßt werden.
- 25 4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, worin mittels einer Lock-In-Auswertung die vorbestimmten Frequenzen detektiert werden.
5. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, worin für die Auswertung der einzelnen Frequenzen eine Fast-Fourier-  
30 Transformation (FFT) vorgesehen ist.
6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, worin eine weiterführende Auswertung durch eine Regressionsanalyse oder mittels eines neuronalen Netzes geschieht.  
35

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, worin  
das Verfahren mittels Kalibrierung sowohl durch mathematisch  
bestimmte, theoretische Werte, als auch durch experimentell  
abgestützte Daten auf einen bestimmten Schichtaufbau kali-  
5 briert wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche zur Er-  
mittlung geometrischer Merkmale bei bekannten thermischen  
Merkmalen oder thermischer Merkmale bei bekannten geometri-  
10 schen Merkmalen des Schichtaufbaues.

## Zusammenfassung

### Thermowellen-Meßverfahren

- 5 Die gleichzeitige Mehrfrequenzanregung mit zwei oder mehreren  
Einzelfrequenzen einer elektrisch modulierbaren Heizlicht-  
quelle ermöglicht die parallele Auswertung entsprechend der  
unterschiedlichen Ansteuerfrequenzen. Dadurch wird die Meß-  
zeit bei der Messung von Mehrschichtsystemen wesentlich ver-  
10 kürzt. Durch geeignete Wahl der Einzelfrequenzanteile der An-  
steuerfrequenzen können diese an das Meßproblem angepaßt wer-  
den.

Figur 1

FIG 1

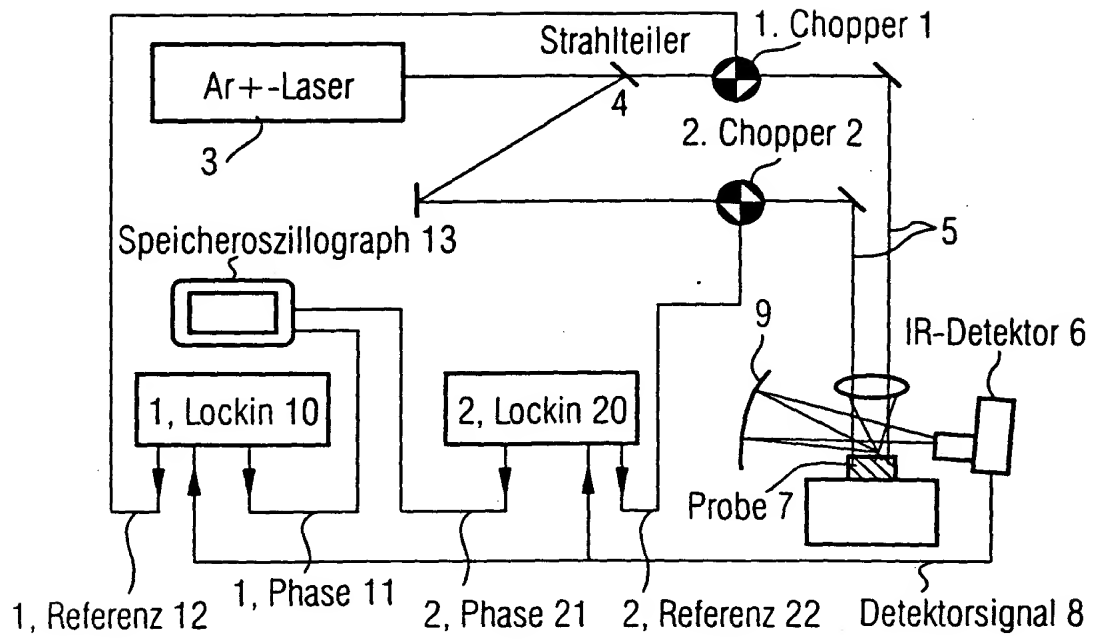
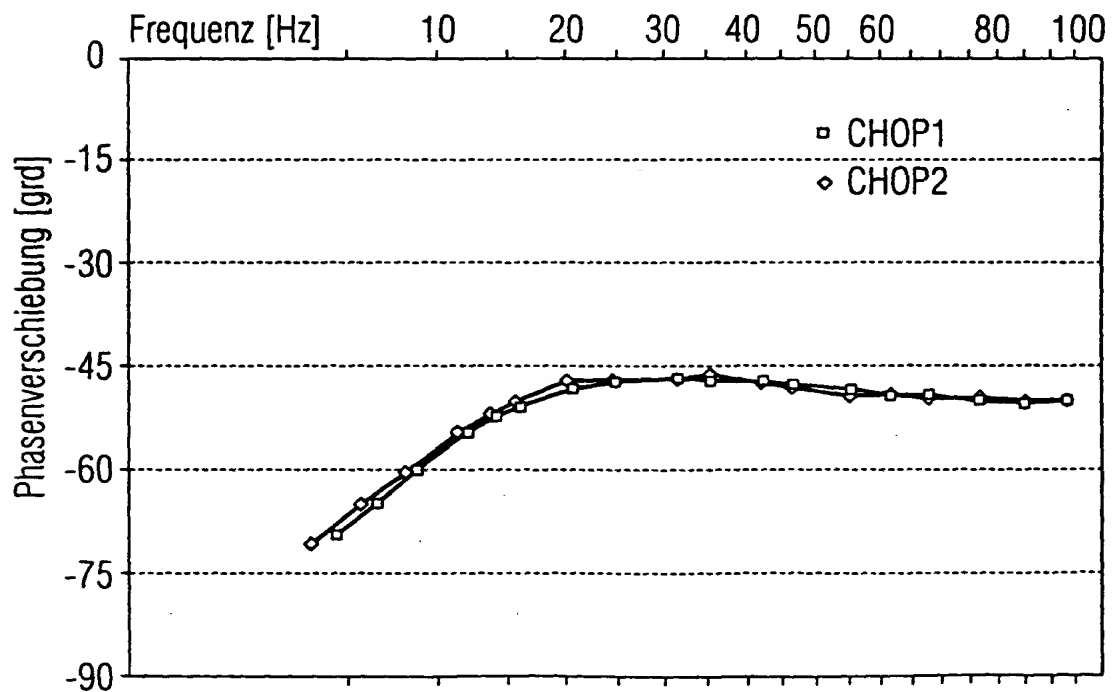
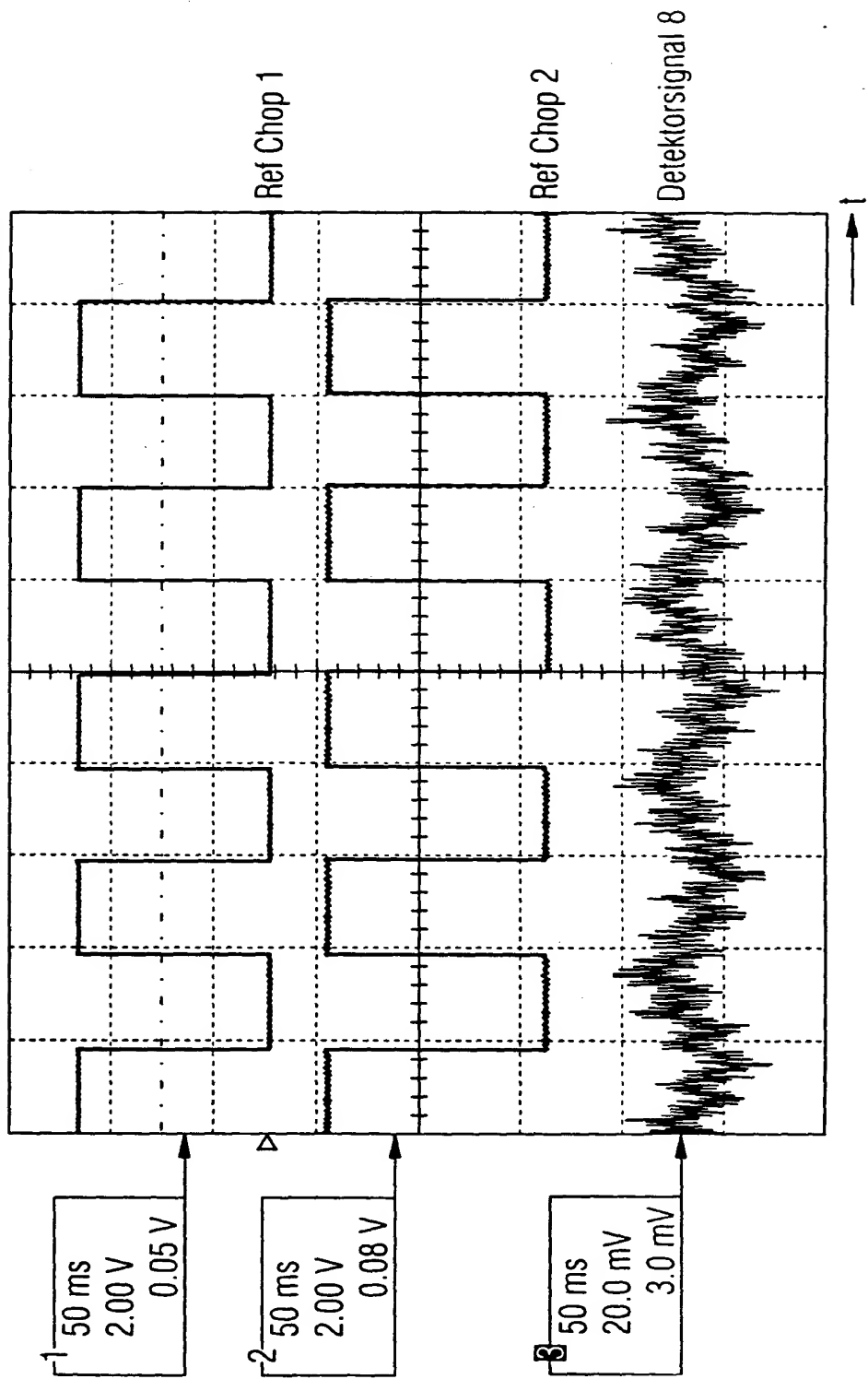


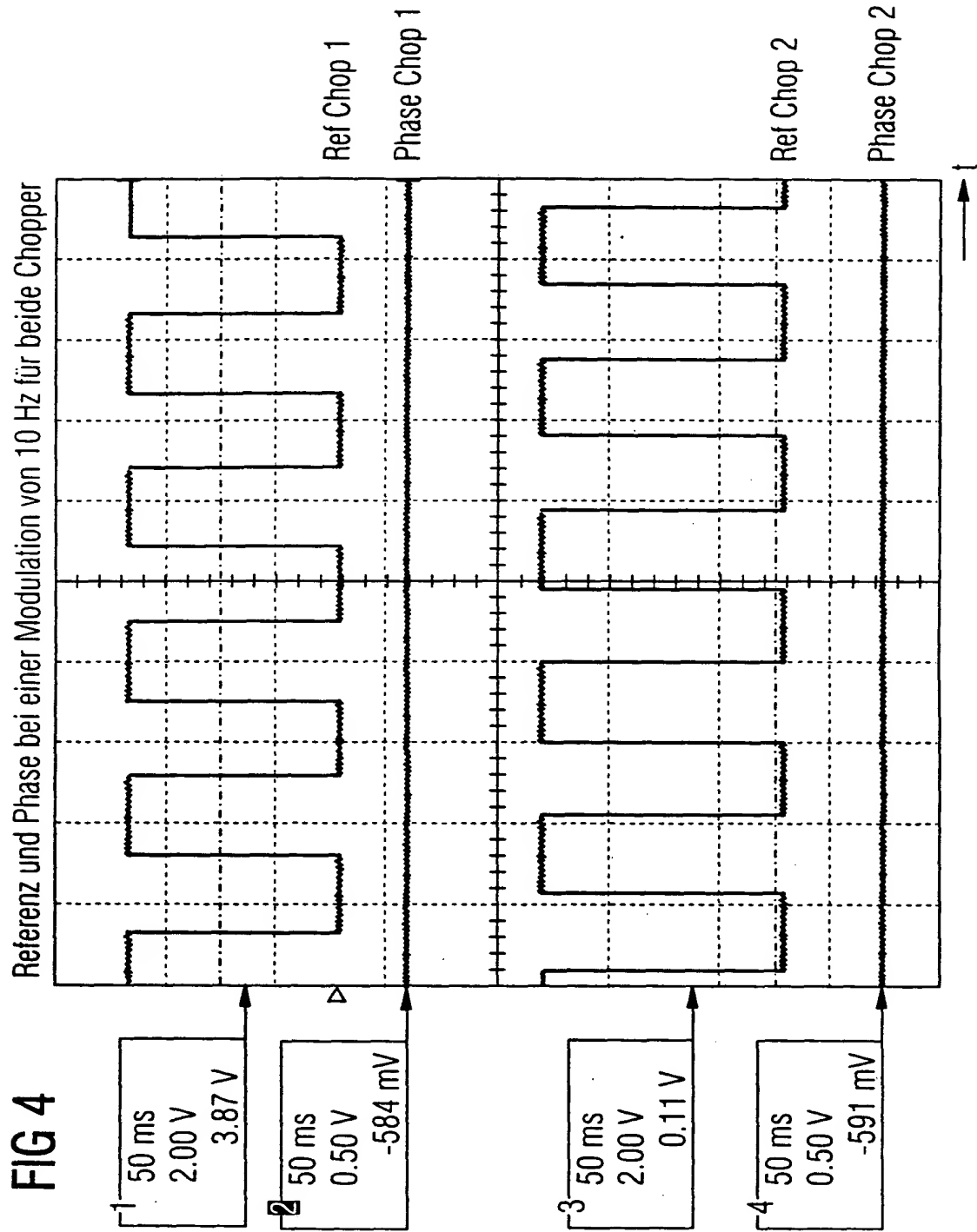
FIG 2

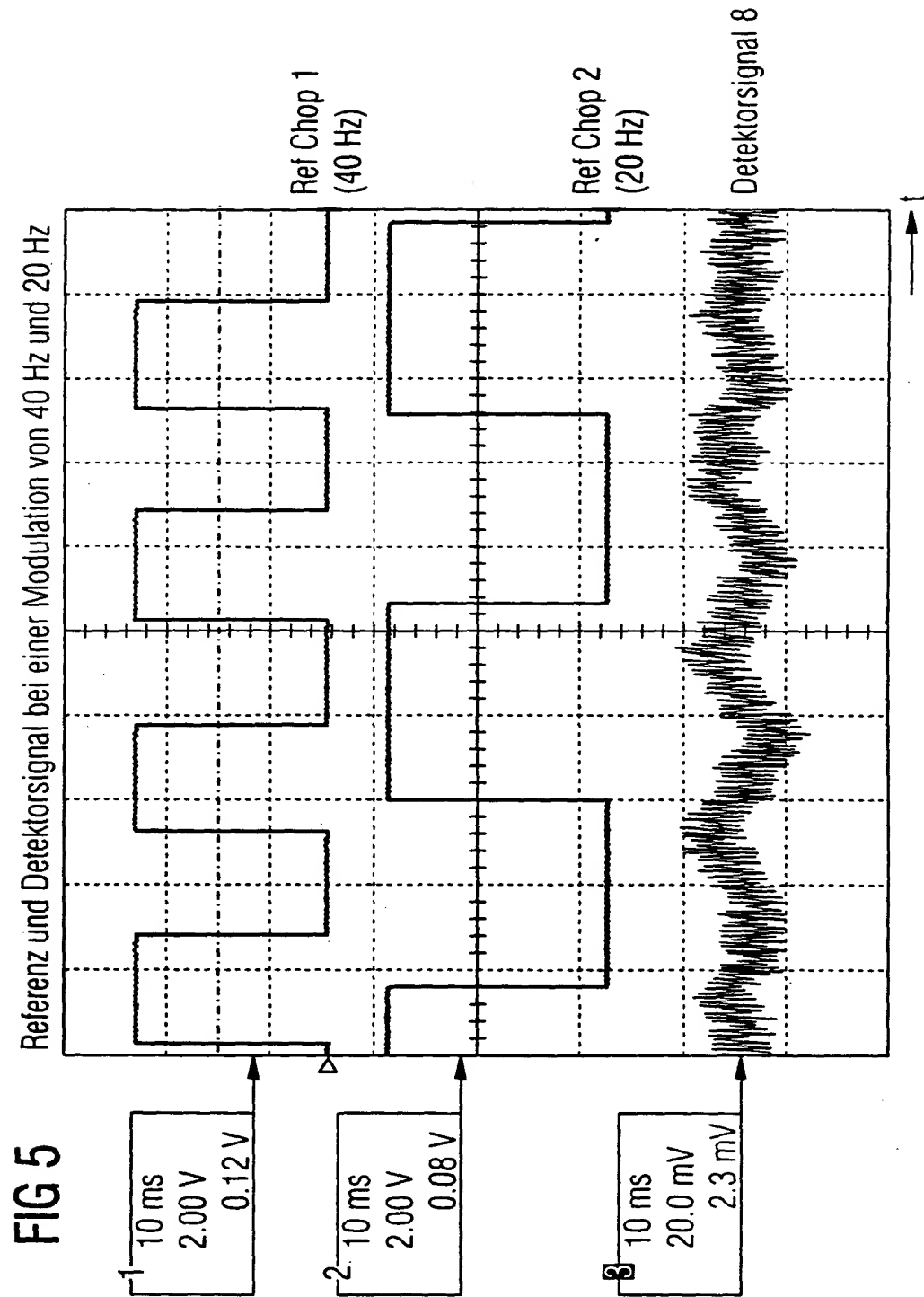


**FIG 3**

Referenz und Detektorsignal bei einer Modulation von 10 Hz für beide Chopper







**FIG 6**

Referenz und Phase bei einer Modulation von 40 und 20 Hz

